ナノメータ加工のための 高精度工具位置出し技術の開発（第1報）*

—基礎実験—

小原 治樹** 富田 悠*** 加門 真一† 笹木 亮** 森田 昇††
池本 有 助††† 神代 充†††

Precise Tool Positioning on Workpiece for Nano-machining (1st Report)
-Fundamental Experiments-

Haruki OBARA, Yu TOMITA, Shinichi KAMON, Tohru SASAKI, Noboru MORITA, Yusuke IKEMOTO and Mitsuru JINDAI

Nano-machining requires precise positioning of a tool on a work piece when the tool is exchanged during the machining. But the usual positioning accuracy is $1\ \mu\text{m}$ or less. In this report we propose a method to detect the relative position of a tool and a work piece by $10\ \text{nm}$ order repeatability. For this positioning, low voltage is supplied between the tool and the work piece, and the contact position of the tool and the work piece is detected from the current variation between them. The voltage and the current is restricted at the level of Scanning Tunneling Microscope (STM). This method has a possibility that the positioning process is done without contact of them, because the detected current is the tunnel current. Experimental results by the fundamental test show that the repeatability of positioning is less than 20nm .

Key words: nano-machining, tool positioning

1. 緒 論

本研究は、ナノメータ領域での工具位置出し技術の開発を目的とする。近年ナノメータ単位の位置決め精度を持つ切削加工機が開発されている^{1)~4)}が、加工途中に工具を交換したり、基準面が指定される場合には、工具とワークの相対位置決めが必要になる。相対位置決めの方法として、工具とワーク間に電圧を印加し、両者の接触時の電流、または電圧変化から接触位置を検知する方法や、接触力から検出する方法があるが、精度は $1\ \mu\text{m}$ 程度である。またシャトル工具の接触時の位置偏差誤差から求める洪らの方法⁵⁾や、工具—ワーク間の間隙を光学的に測定する鈴木らの方法⁶⁾があるが、 $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の精度であり、ナノ加工に対応できていない。

他方、原子分布を観察する走査トンネル顕微鏡(STM)ではプローブ探針と試料間に 0.1V 程度の電圧を印加し、 1nA 程度のトンネル電流が一定になるように探針をx, y, z方向に駆動した経路から 0.1nm 以下の精度で原子分布の計測を行うことができる⁷⁾。このとき、探針と試料は非接触であり、試料に損傷を与えない。よって、電圧印加を用いた工具位置決めにおいても、STMと同等の低い電圧、電流領域を用いれば、非接触で飛躍的に高精度な位置決めができる可能性がある。

そこで本研究では、工具ワーク間に低電圧を印加し、検出電流を低くすることで、位置決めを高精度化する方法を提案する。通常、STMが真空中で用いられるのに対し、本方式は加工に用いるため、真空中でない通常の環境で行う必要がある。しかし、

近年では大気中のイオン化したガスからの電荷と試料に帯電した電子の中和効果を用いた低真空STMが開発されている。またSTMでは極めて鋭い探針を用いるが、本研究は先端半径が大きい工具刃物を用いるため電界強度はSTMに比べ非常に小さいと考えられる。

本報では圧電素子を用いた微小送りが可能な位置決め機構を試作し、ワークと工具に見立てた2つの金属円柱の接触を行い、検出法についての基礎的な検討を行った。また、最近の微細切削加工では通常ダイヤモンド工具が用いられるが、本方式は工具やワークが絶縁体の場合には適用できないため、対策が必要となる。ドーピングしたダイヤモンド工具を用いる方式も考えられるが、高価であり、工具寿命低下の問題もある。ここではダイヤモンドバイトに金蒸着を行い、金属との接触感知を行う方法についても検討を行う。なお、環境が精度に与える影響については第2報に譲るものとする。

2. 実験方法

2.1 実験装置の構成

図1に実験装置の構成を示す。 $\phi 3\text{mm}$ のステンレス丸棒をXYテーブル上に固定し、同径同素材の丸棒を左図の拡大図のようにクロスして対向させ、接触子として接近させる。手動マイクロメータでギャップ $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度まで接近させた後、圧電素子で駆動して接近させる。 nm 単位の変位検出が可能な渦電流式変位計を用いて接近させる丸棒の移動量を計測した。圧電素子は一般的にヒステリシスを有するが、本研究ではセンサにより直接、変位を測定するため位置フィードバック等は必要ない。クリーンルームでの計測が望ましいが、実加工ではクリーンルームを用いないので、衝風を防ぐために図1の実験装置を簡単なカバーで覆う構成とした。丸棒はバフ仕上げした。

* 原稿受付 平成26年8月1日

掲載決定 平成26年11月27日

** 正会員 富山大学大学院 (富山県富山市五福3190)

*** 日本信号株式会社 (東京都千代田区丸の内1-5-1)

† 三協立山株式会社 (富山県高岡市早川70)

†† 正会員 千葉大学大学院 (千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

††† 富山大学大学院 (富山県富山市五福3190)

2.2 接触検知回路

接触検知回路を図2に示す。STMと同程度の電流にするため高インピーダンスの電流制限抵抗 R を介して接触子間に電圧 V_s を印加し、接触時の抵抗間の電圧増加を検出する。検出出力は高入力インピーダンスアンプにより4倍に差動増幅している。また高インピーダンスでは外界のノイズの影響を受け易いため、絶縁アンプで測定機器と分離し、フィルターで商用周波数の雑音をカットしたのち、コンパレータで設定レベルと比較して接触信号を発する。図中の可変抵抗により印加電圧 V_s を0~4.5Vまで可変にし、コンパレータの調整により判定レベル V_L を0~2Vまで可変にできる。

接触子を動かす圧電素子用駆動回路を図3に示す。圧電素子を駆動する際はスタートスイッチを押すと積分回路の出力電圧が線形に増加する。リセットスイッチを押すか、図2から接触感知信号が入ると電圧が0に戻る。この電圧を圧電素子駆動アンプで増幅して圧電素子を駆動する。圧電素子の変位速度は約300nm/sである。

変位センサ回路を図4に示す。変位を計測する渦電流式変位

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Contact detecting circuit

Fig.3 Driving circuits of piezoelectric element

計 (MICRO-EPSILON 社製, eddy NCDT3701-U1-A) の出力は高周波ノイズを含むため、RC回路でフィルタリングを行った。感度は2nm/mVに調整した。電圧値は5桁の高精度デジタルテスタにより読む。接触子をワークに近接させていくと、接触する近傍でセンサ出力が急激に低下し、接触時において最小となる。この接触時の出力を検出する際、サンプリング時間1secのデジタルテスタでは読み取りができないことから、ピークホールド回路を設け、ピークホールドした電圧値をテスタで読み取ることで接触時の電圧を計測した。図4中のダイオードDには低リーク電流の素子を用いた。

2.3 変位センサの温度特性

nm 単位での計測では温度変化による機器伸縮が問題になる。変位センサの温度安定性は10nm/°Cである。接触子が静止した状態におけるセンサの出力電圧変化と温度変化を測定した結果を図5に示す。温度を0.01°C単位で読み取れる温度計を使用し、実験装置を覆うカバーの中に設置した。0.6°C程度の温度変化に対して変位センサ出力は、400nm以上変化している。0.01°C程度の高精度な温度制御が必要と思われるが難しく、また時間遅れがあるため温度を用いた出力補正も困難である。一方、最も変動が大きい箇所の変動は10nm/分程度であるため、可能な限り温度変化の影響を受けないように温度変化が小さい時間帯を選ぶと共に、測定時間を短縮することで温度変化の影響を小さくすることとした。検出結果から出力が温度変化により明確に単調増加または単調減少していると判断した場合には再実験する。

3. 実験結果

接触子間に電圧をかけ、20回の接触感知を行い、繰り返し位置決め精度を判断した。測定時間をできるだけ短くするため、

Fig.4 Schematics of displacement sensor circuit

Fig.5 Drift of displacement sensor

20回の測定が2分程度に収まるようにした。

3.1 判定レベルによるばらつき

印加電圧 $V_s = 1.5\text{V}$ 、制限抵抗値 $R = 10\text{M}\Omega$ で判定レベル V_L を変化させ、位置出し実験を行った。接触位置の変化を図6に示す。図の横軸は繰り返し回数、縦軸は最初の接触距離からの変位量を示す。変位量は接触点が離れる方向が正、接触点に食い込む方向が負である。

STM が真空環境で用いられる理由には大気中の空気分子による電子の散乱が挙げられるが、本実験装置ではばらつきが生じるものの大気中において接触検知を行うことが可能であった。接触検知の原理が STM と同一の非接触の状態での現象であるかについては本報では確認できなかった。これについて接触状態の確認も含めて、今後、検討を行うものとする。

判定レベル V_L を大きくすると接触距離のばらつきが大きくなる傾向にあり、かつ V_L が 50mV 以下ではノイズの影響で接触検知が困難であったため、以後の測定では $V_L = 50\text{mV}$ を用いた。なお $R = 10\text{M}\Omega$ 、 $V_L = 50\text{mV}$ は接触電流 1.25nA に対応する。

3.2 印加電圧および制限抵抗値の最適範囲

印加電圧 V_s を 0.1V 、 0.4V 、 1.5V 、 4.5V として、接触検知を行った。制限抵抗値 R は $10\text{M}\Omega$ 、判定レベル V_L は 50mV とした。図7に測定結果を示す。測定結果より、印加電圧が低いほど接触距離のばらつきが小さくなり、繰り返し精度が改善されることわかる。

一方、制限抵抗値 R は $12\text{k}\Omega$ 、 $100\text{k}\Omega$ 、 $1\text{M}\Omega$ 、 $10\text{M}\Omega$ に変更

Fig.6 Influence of detecting level

Fig.7 Influence of supplied voltage

し、位置出し実験を行った。印加電圧 V_s は 0.1V 、判定レベル V_L は 50mV とした。結果を図8に示す。制限抵抗値が大きいほど繰り返し精度が改善され、 $10\text{M}\Omega$ ではばらつきは 20nm 程度になった。これより制限抵抗の値は大きい方が望ましいことがわかる。しかし、制限抵抗値はアンプの入力インピーダンスよりも十分小さい必要がある。図9は制限抵抗 $10\text{M}\Omega$ の場合と $100\text{M}\Omega$ の場合の検出時の差動アンプの出力を示す。接触検知回路の原理上、接触後に圧電素子が後退し出力信号は 10ms 程度で0に戻るが、 $100\text{M}\Omega$ ではその変化がなだらかになっている。よって本研究では制限抵抗値を $30\text{M}\Omega$ 以下とした。制限抵抗、印加電圧の最適値を求めるため、判定レベル $V_L = 50\text{mV}$ とし、印加電圧 $V_s = 0.1 \sim 4.5\text{V}$ 、制限抵抗値 $R = 12\text{k} \sim 100\text{M}\Omega$ の範囲で位置決め実験を行った結果を図10に示す。印加電圧が小さく、また、制限抵抗値が大きいほど、ばらつきは小さく

Fig.8 Influence of resistance

Fig.9 Output of the differential amp of detecting circuit
(10mV/div, 100ms/div)

Fig.10 Influence of supplied voltage and resistance

なり, $V_s=0.1V$, $R=10M\Omega$ 以上でばらつきが $20nm$ 以下の位置決め精度が得られた。

3.3 接触子の材質の影響

接触子の材質を変え, 位置出し実験を行った。使用した材質はステンレス, アルミニウム, 銅, 黄銅である。形状は全て $\phi 3mm$ の丸棒である。印加電圧 $V_s=0.1V$, 制限抵抗値 $R=10M\Omega$, 判定レベル $V_L=50mV$ とした。測定結果を図 11(a) に示す。図 11(b) は同図(a)の縦軸スケールを拡大したものである。アルミニウムが最も精度が悪く, ばらつきは $1500nm$ であった。この原因として, 材質表面に生じた酸化皮膜の存在が考えられる。

(a) Y-scale -1500~500nm

(b) Y-scale -50~50nm

Fig.11 Influence of materials

Fig.12 Result of positioning with aluminum before and after deposition of Au.

その他の材質には大きな差異は見られず, 銅では $50nm$ 程度, ステンレスと黄銅では $20nm$ 程度の繰り返し精度であり, 黄銅の精度が最も安定していた。

アルミニウムの位置出し精度の悪さは酸化被膜の影響と思われるため, 電極表面に金を蒸着して位置出し実験を行った。印加電圧 $V_s=0.1V$, 制限抵抗値 $R=10M\Omega$, 判定レベル $V_L=50mV$ とした。金蒸着をした場合と, しない場合のアルミニウム接触子による測定結果を図 12 に示す。金蒸着をした場合, 誤差は $50nm$ 程度となり, 銅を用いた場合と同程度のばらつきに改善された。

3.4 ダイヤモンド工具を用いた場合

本研究の検出手法では工具, ワークとも導電性であることが必要である。そのため主に微細加工に用いられるダイヤモンドバイトは, そのまま用いることができない。ダイヤモンドをドーピングして半導体化する方法も考えられるが, 高価になる上, 刃物寿命が低下する恐れがある。そこでダイヤモンド工具に金を蒸着して導電性を持たせた。蒸着は安価であり工具寿命の低下が生じず, 他の絶縁性ワークにも適用可能である。蒸着膜は加工中に剥落するが, 最初の位置出し時にのみ機能すれば良いため, 工具がワークに接触した後は問題にならない。ただし蒸着厚さ分の位置補正が必要である。この方法はガラスなどの絶縁性ワークには適用できないが, 位置出しの基準面のみ蒸着するのであれば, ワークにも適用可能である。

金蒸着を行ったダイヤモンドバイト (アライドマテリアル社製・NWD-CL305) を用いて, 位置出し実験を行った。図 13 に使用したダイヤモンドバイトの形状を示す。蒸着は $30mm$ の距離で 5 分間行い, 約 $50nm$ の蒸着厚さを得た。印加電圧 $V_s=0.1V$, 制限抵抗値 $R=10M\Omega$, 判定レベル $V_L=50mV$ とした。対向面は丸棒 (SUS) と, ステンレス棒材の一部を削り平面にしたものを用いた。丸棒の場合と平面の場合の比較を図 14 に示す。位置のばらつきは丸棒の場合約 $18nm$, 平面の場合約 $16nm$ で

Fig.13 Diamond tool (A.L.M.T.Corp.・NWD-CL305)

Fig.14 Result of positioning with diamond tool

あり、ほぼ同じであった。

測定前後のダイヤモンドバイト先端のFE-SEM像を図15に示す。図15(a)のように接触検知前では表面は清浄な状態であるが、接触検知後の同図(b)では、表面に蒸着が剥離している箇所が見られる。検知回路の原理通りに非接触の検知がなされたとすれば、剥離の主な原因としては静電気力の影響による可能性が挙げられる。

ダイヤモンドバイトを用いて、印加電圧 0.1V、制限抵抗 10M Ω と、印加電圧 4.5V、制限抵抗値 12k Ω の条件で各 20 回の位置出し実験を行った後の、ワーク側接触点表面のFE-SEM像を図16に示す。4.5V、12k Ω では電流が 10 μ A 程度であり、表面は電流による損傷を受けている。0.1V、10M Ω の場合の電流は 1nA 程度であり、損傷は見られない。表面が変色しているのは接触感知時の電流により酸化したためと考えられる。

4. 結 論

- (1) 工具－ワーク間に微小な電圧を印加し、近接時における電圧・電流変化を測定することで、ナノオーダーでの位置出しを行う計測手法を提案した。
- (2) 試作した装置により、20nm 以下の位置出しを可能とした。
- (3) 印加する電流、電圧を抑えることで、位置出し精度を向上させることができた。

(a) Before positioning

(b) After positioning

Fig.15 FE-SEM photo of diamond tool nib after 20 time positioning

- (4) SUS, 黄銅では 20nm 以下、銅では 50nm 程度の精度での位置出しが可能であった。アルミニウムでは精度が極めて悪いが、蒸着により 50nm 程度に改善された。
- (5) 導電性を持たないダイヤモンドバイトでも蒸着することで位置出しが可能であり、20nm 程度の位置精度が得られた。

参 考 文 献

- 1) 大塚二郎：精密・超精密位置決め技術の基礎，精密工学会誌，77，7，(2011) 656.
- 2) 宗石猛，富川義朗：圧電モータを用いたナノメートルオーダー高精度リニアステージ，日本音響学会誌，60，12，(2004) 711.
- 3) 蛭原建三，山本明，河合知彦，羽村雅之：超精密多軸加工機によるマイクロ・ナノ切削加工，日本機械学会誌，111，1073，(2007) 320.
- 4) 皆川伸廣，鏡重次郎，川口尊久，畑沢鉄三：微小変位特性のナノ位置決めへの応用，日本機械学会関東支部ブロック合同講演集，(2002) 159.
- 5) 洪榮杓，蛭原建三，山本明，河合知彦：超精密加工機における工具刃先とワーク面の接触検知機能—工具刃先のダイレクトセンシング—，2007 年度精密工学会春季大会講演集，(2007) 687.
- 6) 鈴木伸哉，神谷和秀，前田幸男：マイクロエンドミルと被削材との間隔のインコヒーレント光による非接触距離測定法，先端加工，26，1 (2008) 27.
- 7) 日本表面科学会編：表面科学の基礎と応用，(2004).

(a) $V_s=4.5V$, $R=12k\Omega$

(b) $V_s=0.1V$, $R=10M\Omega$

Fig.16 SEM photo of contact surface after 20 time positioning